

UTRJEVANJE ALUMINIJA IN ZLITIN PRI VZDOLŽNEM HLADNEM VALJANJU

HARDENING OF ALUMINIUM AND ALLOYS BY LONGITUDINAL COLD ROLLING

Trajanka Vasevska

Raziskovanje in eksperimentalni razvoj na področju metalurgije, Prvomajska ul. 5, 2310 Slovenska Bistrica, Slovenija
Impol, d. d., Sektor Razvoj, Partizanska 38, 2310 Slovenska Bistrica, Slovenija
trajanka.vasevska@rerp-m-vasevska.si ; trajanka.vasevska@impol.si

Prejem rokopisa – received: 2004-02-20; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-04-06

Aluminij in njegove zlitine se lahko vzdolžno valjajo z izmeničnim spreminjanjem smeri valjanja za 180°. Raziskan je vpliv spremembe smeri valjanja na mehanske lastnosti in mikrostrukturo hladno valjanega aluminijskega traka.

Ključne besede: hladno valjanje, smer valjanja, mehanske lastnosti, plastična deformacija, mikrostruktura

When using longitudinal cold strip rolling of aluminium and its alloys the deformation direction is changed by 180°. The influence of rolling-direction change on the mechanical properties and the microstructure of aluminium was investigated.

Key words: cold rolling, rolling direction, mechanical properties, plastic deformation, microstructure

1 UVOD

Pred leti je bil v Impolu uveden sistem računalniškega izpisa tehnoloških nalog, za katerega so potrebni zelo natančni podatki o tehnološkem postopku. Tehnologi so morali zelo natančno opredeliti parametre tehnologije valjanja, predvsem število prevlekov in skupno deformacijo, vse v intervalih, ki zagotavljajo vnaprej predpisane mehanske lastnosti izdelka z upoštevanjem vseh značilnosti vsake zlitine. Da bi to dosegli, so morali pripraviti zelo veliko število izpisanih nalog in upoštevati številne vplivne parametre, med njimi tudi vpliv spremembe smeri valjanja na končne mehanske lastnosti izdelka.

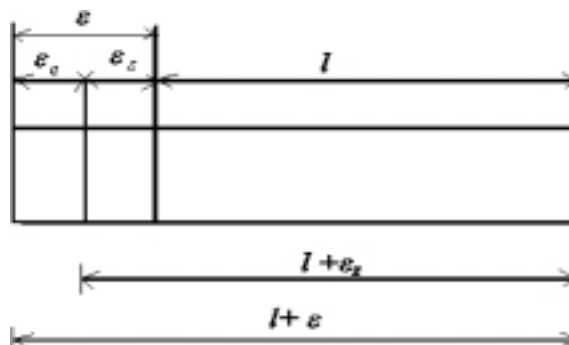
2 PLASTIČNA DEFORMACIJA

Trdne kovine spreminjajo obliko pod vplivom zunanje sile. Preoblikovalne lastnosti so odvisne od kristalne zgradbe, kemijske sestave in mikrostrukture. Kristalne ploskve in smeri premikanja dislokacij so različne pri plastični deformaciji kovin in zlitin z zelo različno kristalno mrežo^{1,4}. Število ploskev in smeri ni v vseh kristalnih mrežah enako, zato so nekatere kovine bolj plastične, med njimi so tudi aluminij in njegove zlitine.

Aluminijeve zlitine vsebujejo binarne ali večkomponentne faze ali kemične (intermetalne) spojine v obliki vključkov, ki imajo različno obliko in velikost in so različno porazdeljeni v matici. Zato močno vplivajo na plastičnost in mehanske lastnosti. Temu ustrežna je različna tehnologija predelave, ki zagotavlja zahtevane lastnosti izdelkov.

Pri načrtovanju postopka valjanja so zelo pomembne meja plastičnosti $R_{p0,2}$, natezna trdnost R_m in sprememba dimenzij. Meja plastičnosti $R_{p0,2}$ je temeljni podatek za izračun natezne sile pri navijanju traka v kolobar, natezna trdnost R_m pa opredeljuje stopnjo utrjevanja materiala med plastično deformacijo. Sprememba dimenzij v zoni elastične deformacije je potrebna zato, da dovolj natančno določimo velikost reže pri valjanju, da je ta dovolj velika.

Na **sliki 1** so shematično prikazane spremembe dolžine pri valjanju³. Elastična deformacija aluminija in njegovih zlitin je zelo majhna in ni pomembna pri določanju tehnoloških parametrov. Elastična deformacija ϵ_e in meja elastičnosti $R_{0,005}$ ali $R_{0,01}$ se določata s posebno metodo z napravo, ki lahko registrira 0,001 % raztezka dolžine preizkušanca oziroma 0,0005 mm podaljška⁴.



Slika 1: Spremembe dimenzije pri plastični deformaciji materiala. ϵ_e – elastični raztezek, ϵ_{pl} – plastični raztezek, l – dolžina pred deformacijo
Figure 1: Dimension changes for the plastic deformation of metals. ϵ_e – elastic elongation, ϵ_z – plastic elongation, l – length before deformation

Meja plastičnosti $R_{p0,2}$ je opredeljena kot napetost pri kateri se material plastično deformira za 0,2 %. Določa se po enaki metodi kot $R_{0,005}$ ali $R_{0,01}$ z napravo, ki pokaže 0,05 % raztezka oziroma 0,01 mm podaljška merilne dolžine⁴. Podaljšek ϵ_z se v praksi pojavlja kot raztezek A_5 ali A_{10} , ki sta izražena v odstotkih.

Dimenzija obdelovanega telesa med valjanjem je $(1 + \epsilon)$, po prenehanju obremenitve pa $(1 + \epsilon_z)$.

Zakon o podobnosti omogoča, da se s primerno laboratorijsko opremo za predelavo kovin okvirno določijo nekateri tehnološki parametri predelave, kar omogoča, da se pri proizvodnji izognemo riziku pri uvajanju novih tehnologij. Matematična oblika tega zakona je:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{G_1}{G_2} \quad (1)$$

A_1, A_2 – delo
 V_1, V_2 – prostornina
 G_1, G_2 – masa

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (2)$$

P_1, P_2 – sila
 F_1, F_2 – ploščina

3 VALJANJE

Valjanje je plastična deformacija materiala v reži med dvema valjema, ki se vrtna v nasprotni smeri. Pri valjanju plošč in trakov imata valja ravno, pri valjanju profilov pa reliefno površino². V tem delu je obravnavano le ploskovno linijsko valjanje trakov.

Ravna in gladka valja prevzameta debelejši valjanec, če je skladno s **sliko 2** izpolnjen pogoj³:

$$P \cdot \mu \cdot \cos \alpha \geq P \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$\mu \geq \alpha \quad (4)$$

$$H > h \quad (5)$$

P – sila, s katero valji pritiskajo na material (sila valjanja)

μ – koeficient trenja

α – kot zajemanja

H – vhodna debelina materiala

h – izhodna debelina materiala

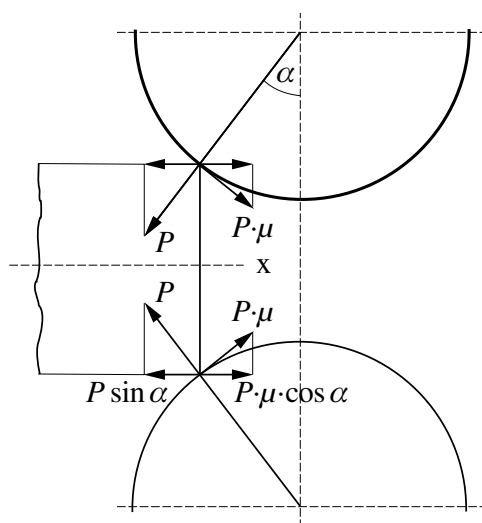
Pri prehodu skozi valje se večina deformacije izvrši s podaljškom valjanca v smeri valjanja, del pa tudi z njegovim širjenjem. Širjenje izračunamo z Leon-Žazvovo enačbo³, odvisno pa je od vhodne debeline valjanca, od koeficienta trenja in od premera valjev.

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \cdot \left(\mu \frac{R}{H} \cdot \frac{\Delta h}{H} \cdot \frac{\Delta h}{2H}\right) \cdot \Delta h \quad (6)$$

$$\Delta h = H - h \quad (7)$$

H – debelina valjanca pred deformacijo

h – debelina valjanca po deformaciji



Slika 2: Sile med valji in valjancem na začetku valjanja

Figure 2: Forces between the cylinder and the material at the start of rolling

Δh – odvzem pri valjanju

μ – koeficient trenja

R – polmer delovnih valjev

Končna vrednost je seštevek širjenja pri vsakem prehodu valjanca med valji. V praksi je širjenje materiala pomembno pri vročem valjanju, posebno pri valjanju debelih valjancev in profilov, pri hladnem valjanju pa je širjenje zanemarljivo majhno in zato se pri njem predpostavlja, da je povečanje širine $\Delta B = 0$ in se upoštevata le odvzem Δh in podaljšek Δl .

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (8)$$

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (9)$$

Δh – odvzem

h_0 – višina valjanca pred deformacijo

Δl – podaljšek

l_0 – dolžina valjanca pred deformacijo

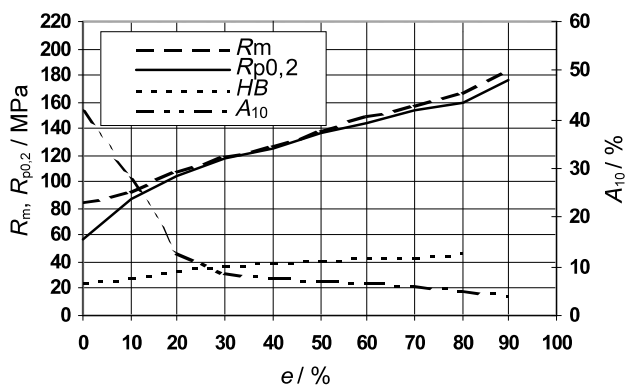
h_1, l_1 – višina, dolžina valjanca po deformaciji

4 REZULTATI PREISKAV

V letu 1989/1990 smo v Impolu pripravljali tehnološke parametre za računalniško vodenje tehnologije valjanja. Treba je bilo tudi ugotoviti, kako sprememba smeri valjanja vpliva na mehanske in tehnološke lastnosti materiala. Rezultati preizkusov so pokazali, da izmenična sprememba smeri valjanja za 180° pri istem valjancu ne vpliva na končne lastnosti aluminija in njegovih zlitin. Ta pojav je bil potrjen tudi pri vlečenju žice iz aluminija in njegovih zlitin.

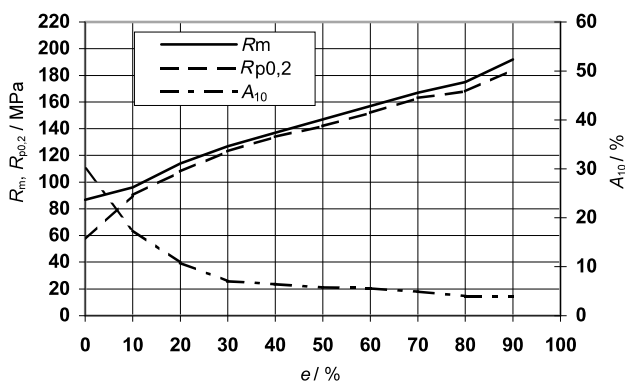
Na **slikah 3, 4, 5 in 6** so prikazane najmanjše vrednosti meje plastičnosti $R_{p0,2}$, natezne trdnosti R_m , trdote po Brinellu HB in raztezka A_{10} za hladno valjan trak iz aluminija Al99,5 (DIN 1712).

Na **slikah 7, 8, 9 in 10, a, b**, so prikazane metalografske strukture Al99,5 v hladno valjanem stanju za



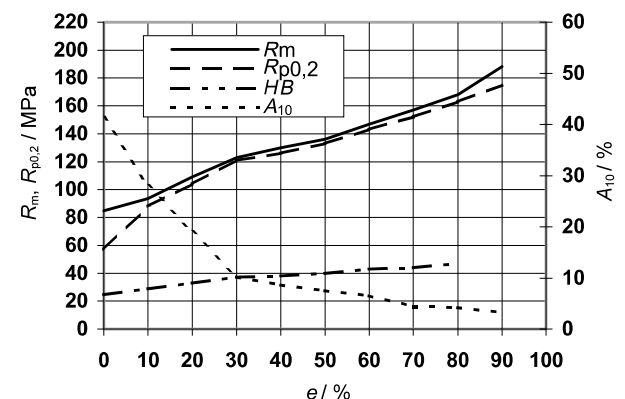
Slika 3: Sprememba lastnosti toplo valjanega traku A199,5 pri hladnem valjanju v eni smeri. Sprememba natezne trdnosti (R_m), meje plastičnosti ($R_{p0,2}$), trdote (HB) po Brinellu in raztezka (A_{10}) vzdolž smeri valjanja

Figure 3: Change of properties of hot-rolled Al99.5 strip when cold rolled in the same direction. Change of tensile strength R_m , yield strength $R_{p0,2}$, Brinell hardness HB and elongation A_{10} , longitudinal to the direction of rolling



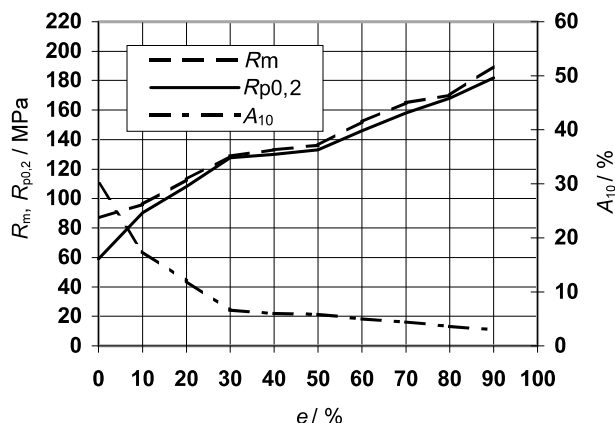
Slika 4: Sprememba lastnosti toplo valjanega traku A199,5 pri hladnem valjanju v eni smeri. Sprememba natezne trdnosti (R_m), meje plastičnosti ($R_{p0,2}$) in raztezka (A_{10}), prečno na smer valjanja

Figure 4: Change of properties of hot-rolled Al99.5 strip when cold rolled in the same direction. Change of tensile strength R_m , yield strength $R_{p0,2}$ and elongation A_{10} , transverse to the direction of rolling



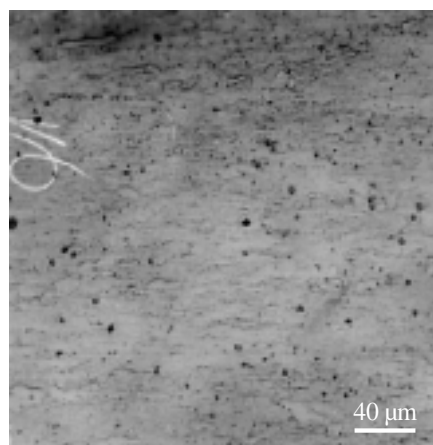
Slika 5: Sprememba lastnosti toplo valjanega traku A199,5 pri hladnem valjanju z izmenično spremembo smeri valjanja za 180° . Sprememba natezne trdnosti (R_m), meje plastičnosti ($R_{p0,2}$), trdote (HB) po Brinellu in raztezka (A_{10}) vzdolž smeri valjanja

Figure 5: Change of properties of hot-rolled Al99.5 strip when cold rolled with an alternate change of the rolling direction by 180° . Change of tensile strength R_m , yield strength $R_{p0,2}$, Brinell hardness HB and elongation A_{10} , longitudinal to the direction of rolling

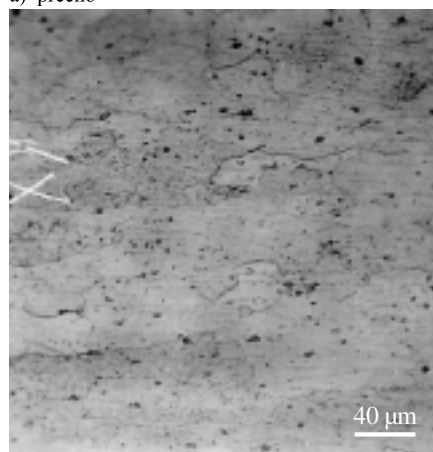


Slika 6: Sprememba lastnosti toplo valjanega traku A199,5 pri hladnem valjanju z izmenično spremembo smeri valjanja za 180° . Sprememba natezne trdnosti (R_m), meje plastičnosti ($R_{p0,2}$) in raztezka (A_{10}), prečno na smer valjanja

Figure 6: Change of properties of hot-rolled Al99.5 strip when cold rolled with an alternate change of the rolling direction by 180° . Change of tensile strength R_m , yield strength $R_{p0,2}$ and elongation A_{10} , transverse to the direction of rolling



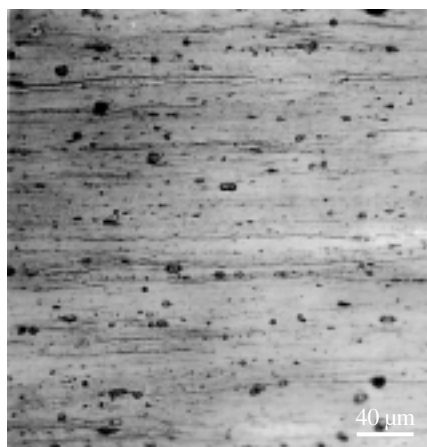
a) prečno



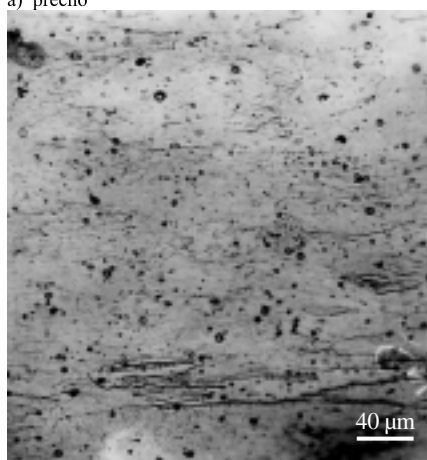
b) vzdolžno

Slika 7: Mikrostruktura hladno valjanega traku A199,5, 16-odstotna redukcija, začetek hladnega valjanja: a) prečno na smer valjanja, b) vzdolžno na smer valjanja. Povečava 250-kratna

Figure 7: Microstructure of cold-rolled Al99.5 strip, 16 % deformation. Start of cold rolling a) transverse to the direction of rolling; b) longitudinal to the direction of rolling; 250 x



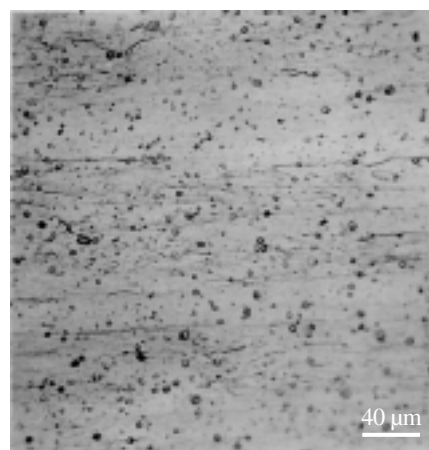
a) prečno



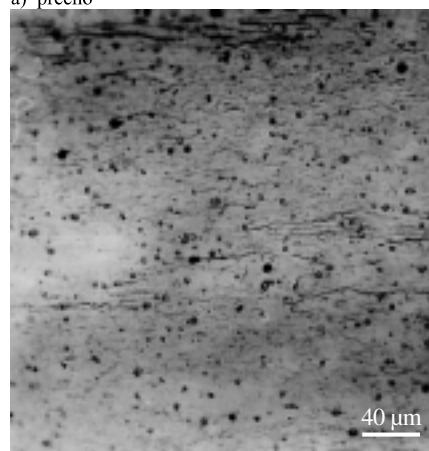
b) vzdolžno

Slika 8: Mikrostruktura hladno valjanega traka Al99,5, 52-odstotna redukcija z izmenično spremembo smeri valjanja: a) prečno na smer valjanja, b) vzdolžno na smer valjanja. Povečava 250-kratna

Figure 8: Microstructure of cold-rolled Al99.5 strip, 52 % deformation with an alternate change of the rolling direction: a) transverse to the direction of rolling, b) longitudinal to the direction of rolling; 250 x



a) prečno



b) vzdolžno

Slika 9: Mikrostruktura hladno valjanega traka Al99,5, 30-odstotna redukcija z izmenično spremembo smeri valjanja: a) prečno na smer valjanja, b) vzdolžno na smer valjanja. Povečava 250-kratna

Figure 9: Microstructure of cold-rolled Al99.5 strip, 30 % deformation with an alternate change of the rolling direction. a) transverse to the direction of rolling; b) longitudinal to the direction of rolling; 250 x

različne stopnje in smeri deformacij, prečno in vzdolžno na smer valjanja.

Valjanje s stopnjo redukcije nad 80 % je bilo opravljeno na manjši hladni valjarni s ciljem, da se ugotovi, kaj se dogaja v materialu pri zelo visokih redukcijah, ki se sicer ne uporabljajo pri hladnem valjanju aluminija in njegovih zlitin v redni proizvodnji.

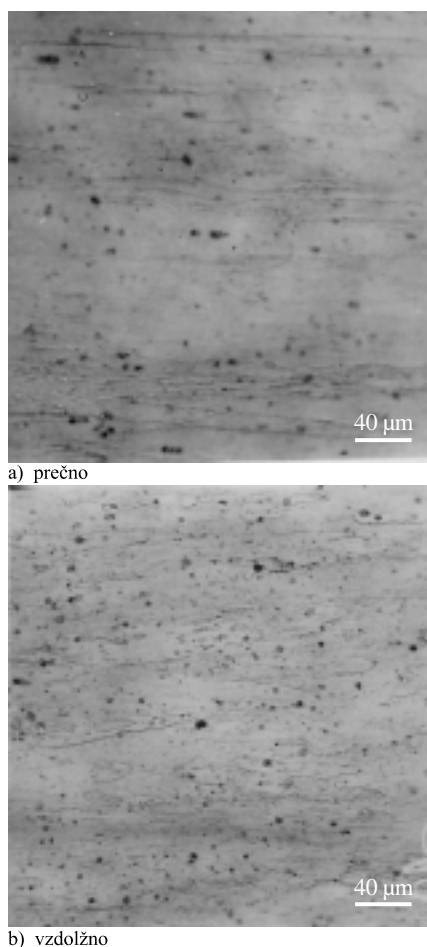
Če primerjamo natezno trdnost R_m in mejo plastičnosti $R_{p0,2}$, trdoto po Brinellu HB in raztezek A_{10} za vzdolžne preizkušance iz traka Al99,5, valjanega v eni smeri (slika 3), in za trak, valjan z izmenično spremembo smeri valjanja za 180° (slika 5), ugotovimo, da se natezna trdnost R_m in meja plastičnosti $R_{p0,2}$ spreminjata v intervalu od 0,1 MPa do 5 MPa, trdota po Brinellu HB in raztezek A_{10} pa sta enaka.

Natezna trdnost R_m in meja plastičnosti $R_{p0,2}$ sta za trakaste preizkušance Al99,5, valjane v eni smeri (slika 4), in z izmenično spremembo valjanja za 180° (slika 6) med 5 MPa in 8 MPa, raztezek A_{10} pa je enak.

Primerjava med vzdolžnim in prečnim preizkušancem za trak Al99,5, valjan v eni smeri, pokaže, da sta natezna trdnost R_m in meja plastičnosti $R_{p0,2}$ večja za 7 – 20 MPa pri prečnih preizkušancih, raztezek A_{10} pa je manjši. Razlika v raztezkju se izgubi pri večjih stopnjah redukcije.

Pri traku Al99,5, valjanem z izmenično spremembo smeri za 180°, sta natezna trdnost R_m in meja plastičnosti $R_{p0,2}$ pri prečnih preizkušancih večja od vzdolžnih za 3 – 9 MPa, raztezek A_{10} pa je manjši pri manjši redukciji, toda pri večji redukciji se ta razlika izgubi.

Metalografske strukture prečnih in vzdolžnih preizkušancev za Al99,5 valjanih v enako smer in z izmenično spremembo smeri valjanja za 180°, so za nekatere primere prikazani na slikah od 7 do 10. S teh slik je razvidno, da sprememba smeri valjanja ne vpliva na mikrostrukturo, ki je pri enaki redukciji enaka, ne glede na način valjanja. Pri redukcijah, večjih od 50 %, po-



Slika 10: Mikrostruktura hladno valjanega traka A199,5, 76-odstotna redukcija z izmenično spremembo smeri valjanja: a) prečno na smer valjanja, b) vzdolžno na smer valjanja. Povečava 250-kratna

Figure 10: Microstructure of cold-rolled A199.5 strip, 76 % deformation with an alternate change of the rolling direction: a) transverse to the direction of rolling, b) longitudinal to the direction of rolling; 250 x

stane mikrostruktura prečnih in vzdolžnih preizkušancev zelo podobna.

5 RAZPRAVA

Cilj hladnega valjanja aluminija in njegovih zlitin je doseči pri določeni dimenziji mehanske lastnosti, ki omogočajo uporabo materiala pri kupcih. Zato je zelo pomembno, da vemo, kako poteka utrjevanje materiala pri deformaciji in kakšne spremembe pri tem nastanejo v mikrostrukturi.

Pri plastični deformaciji kovin z valjanjem se kristalne ploskve pomikajo v smeri, v katero jih iztiska naraščajoča deformacija med valjanjem, katere rezultat je enosmerni podaljšek. Pomiki kristalnih ploskev so tem večji, čim večja je deformacija. Ves premik se izvrši

enosmerno, v smeri podaljška kovine, in ko se smer valjanja obrne za 180°, nastane podaljšek v nasprotni smeri.

Natezna trdnost R_m , meja plastičnosti $R_{p0,2}$, trdota po Brinellu HB , raztezek A_{10} in metalografske analize prečnih in vzdolžnih preizkušancev za trak A199,5, valjan v eno smer in z izmenično spremembo smeri valjanja za 180°, kažejo, da smer valjanja ne vpliva na mehanske lastnosti aluminija in tudi ne na plastičnost. Ta pojav se je pokazal tudi pri analizi rezultatov valjanih in vlečenih preizkušancev iz aluminijevih zlitin.

Pri 30-odstotni skupni redukciji in manjši je edina sprememba v mikrostrukturi sploščitev enakoosnih poligonalnih kristalnih zrn. Pri večji deformaciji se v mikrostrukturi pokažejo valovite črte, ki so sledovi pomika dislokacij in kažejo, da pri zadostni deformaciji drsenje preskakuje iz ene v drugo vzporedno kristalno ploskev z istim kristalografskim indeksom. Pri deformaciji so intermetalne faze pasivne, ni pretoka materiala, lahko se prerazporedijo tudi na kristalne meje^{5,6}.

Pri hladnih deformacijah se energija deformacije pretvori v toploto. Hlajenje med valjanjem prepreči, da bi se temperatura dvignila na tisto raven, ki omogoča procese poprave, rekristalizacijo in difuzijo. Plastovitost postane zelo izrazita šele, ko skupna redukcija zraste nad 90 %.

6 SKLEP

Aluminij in njegove zlitine se valjajo na reverzirnem ogrođju, ki je postavljeno med odvijalno/navijalno napravo, s čimer se izognemo dolгим valjarniškim program. Pri prvem prehodu se material valja z zahtevano stopnjo redukcije, v naslednjem se previja, da bi se ohranila enaka smer valjanja pri naslednji deformaciji.

Spoznanje, da sprememba smeri valjanja za 180° ne vpliva na mehanske in strukturne lastnosti aluminija, omogoča, da se izognemo praznemu hodu pri valjanju.

Čas, potreben za hladno valjanje, se s tem močno zmanjša, prihranek energije pa je tudi pomemben, zato je produktivnost večja, strošek valjanja pa manjši.

7 LITERATURA

- ¹Z. Wusatowski, Fundamentals of rolling, Katowice 1969, Ch. 1, 1–8
- ²M. Čaušević, Valjanje i kalibriranje, Tehnička knjiga, Beograd 1962, 227–236
- ³N. Mišković, B. Mišković, Teorija plastične prerade metala, Tehnološko metalurški fakultet, Beograd 1977, 24–34, 157–167
- ⁴Metalurški priročnik, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1972, 63–81, 137–139
- ⁵F. Vodopivec, Kovine in zlitine, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana 2002, 9–27
- ⁶H. Šuman, Metalografija, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd 1965, 240–260